

Anežka JURČÍKOVÁ¹, Miroslav ROSMANIT²

**MOŽNOST VYUŽITÍ NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ
PRO POSOUZENÍ ÚNOSNOSTI SVAŘOVANÉHO STYČNÍKU**

**THE POSSIBILITY OF USING NUMERICAL MODELING
FOR ASSESSMENT OF WELDED JOINT LOAD-BEARING CAPACITY**

Abstrakt

Jako námět této práce byl použit příklad ocelové příhradové konstrukce z praxe. Konkrétně byl zvolen styčník dolního pásu z HEA profilu a RHS mezipásových prutů, který je výjimečný tím, že se odchyluje od geometrických podmínek udávaných Eurokódem. Cílem práce je vytvoření numerického modelu, který bude dostatečně vystihovat skutečné chování takového styčníku a následné porovnání tohoto chování s tím, které je možné očekávat na základě posouzení dle normových vztahů.

Klíčová slova

Příhradová konstrukce, N-styčník, MKP, RHS, HEA.

Abstract

As the theme of this paper the practical example of the steel lattice structure was used. Specifically, the joint consisting of H-profile bottom chord and a RHS (Rectangular Hollow Section) brace members has been elected. This particular joint has an exceptional feature which is a deviation from the geometric conditions given by Eurocode. The aim is to create a numerical model that will adequately reflect the actual behavior of this type of joint as well as comparison of such behavior with that expected on the basis of assessment according to standardized formulas.

Keywords

Lattice structure, N-joint, FEM, RHS, HEA.

1 ÚVOD

I v dnešní době se pro různé typy staveb často navrhuje ocelové příhradové konstrukce z dutých průřezů nebo z kombinace dutých a otevřených průřezů. Takové konstrukce jsou vhodné pro překonávání velkých rozponů a jejich použití má mnoho výhod (dvojose symetrický průřez, zkrácení vzpěrných délek, požadovaná únosnost při zachování subtilnosti konstrukce). Problematické je zde však řešení styčníků. Návrhové postupy, které udává Eurokód [1], jsou komplikované, obtížně kontrolovatelné a mají pouze omezené použití (geometrické podmínky, omezení materiálových charakteristik, pouze určité typy styčníků s danými způsoby zatížení).

Stále častěji se proto objevuje potřeba ověřit chování styčníků, které nevyhovují omezením daných Eurokódem a nelze je tedy přesně posuzovat na základě normových vztahů pro výpočet

¹ Ing. Anežka Jurčíková, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 391, e-mail: anezka.jurcikova@vsb.cz.

² Ing. Miroslav Rosmanit, Ph.D., Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 398, e-mail: miroslav.rosmanit@vsb.cz.

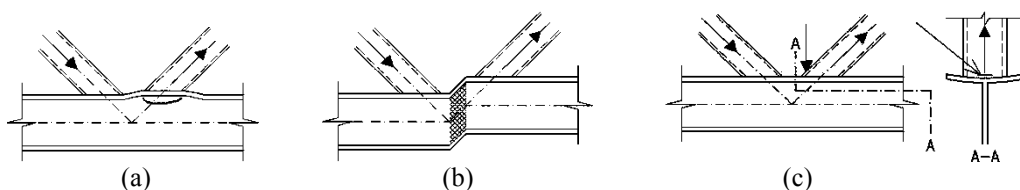
únosností styčnicků. Pro tuto práci byl tedy vybrán příklad z praxe - zastřešení tvořené ocelovým příhradovým vazníkem s pásy z HEA profilů a s RHS mezipásovými pruty. Na této konstrukci byl navržen styčník, který vybočuje z mezí, které udává Eurokód pro použití základních vzorců pro výpočet únosnosti takového styčníku. Konkrétně jde o úhel napojení tažené diagonály na spodní pás, který je menší než 30° .

Cílem této práce bylo ověřit, zda lze chování takového styčníku, který nezapadá do podmínek daných normou, i přesto vystihnout pomocí zavedených normových postupů.

2 OČEKÁVANÉ ZPŮSOBY PORUŠENÍ STYČNÍKU DLE ČSN EN 1993-1-8

Norma [1] uvažuje u styčnicků mezipásových prutů z CHS nebo RHS a pásů z průřezů I nebo H tyto způsoby porušení (Obr. 1.), viz také [2], nebo [3]:

- **Porušení stojiny pásu** zplastizováním, podrcením nebo ztrátou stability tvaru;
- **Porušení pásu smykem**;
- **Porušení mezipásového prutu** (trhliny ve svarech nebo mezipásových prutech)

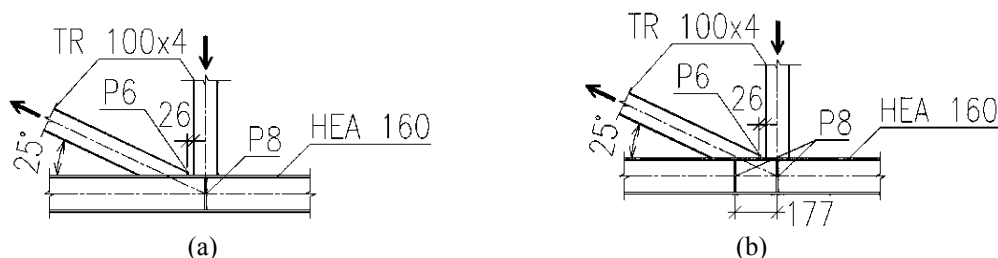


Obr. 1: (a) Porušení stojiny pásu; (b) Porušení pásu smykem; (c) Porušení mezipásového prutu

Eurokód ve vzorcích pro výpočet únosnosti pro jednotlivé typy porušení nijak nezohledňuje síly nebo napětí, která vznikají v sousedních prutech. Vychází se zde pouze z geometrie styčníku, z typů profilů a z hodnot mezí kluzu použitého materiálu. Z toho důvodu byly řešeny dva různé zatěžovací stavy, při kterých bylo porovnáváno chování styčníku, který byl zatížen pouze silou v tažené diagonále, a styčníku, který byl zatížen reálnými silami (tedy jak silou v tažené diagonále, tak tahovou silou v dolním pásu).

3 POSOUZENÍ ŘEŠENÉHO N-STYČNÍKU POMOCÍ NORMOVÝCH VZTAHŮ

U styčníku, který je předmětem řešení této práce, byly uvažovány dvě návrhové situace – první s výztuhou umístěnou jen pod tlačенou svislicí a druhá s přidáním výztuhy také pod taženou diagonálu. Geometrii styčníku a umístění výztuh lze vidět na Obr. 2.



Obr. 2: Geometrie N styčníku pásu z HEA profilu a RHS mezipásových prutů
(a) První návrhová situace; (b) Druhá návrhová situace.

Ačkoliv styčník nesplňuje jednu z geometrických podmínek, které jsou uvedeny v normě, bylo provedeno orientační posouzení obou návrhových situací na základě normových vztahů. Jednalo se o posouzení tažené diagonály, která je více namáhána.

3.1 Normové vztahy pro posouzení tažené diagonály

1. Porušení stojiny pásu - vyboulení stěny

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} \cdot t_w \cdot b_w}{\sin \theta_1} / \gamma_{M5} \quad (1)$$

kde:

- f_{y0} – mez kluzu materiálu dolního pásu [MPa],
 h_1 – výška průřezu mezipásového prutu [mm],
 t_w, t_f, t_1 – tloušťka stojiny a pásnice H/I průřezu a tloušťka stěny uzavřeného profilu [mm],
 r – poloměr zaoblení H/I průřezu [mm],
 θ_1 – úhel, který svírají připojené pruty [°],
 γ_{M5} – součinitel bezpečnosti materiálu [1,0] a

$$b_w = \frac{h_1}{\sin \theta_1} + 5 \cdot (t_f + r) \leq 2 \cdot t_1 + 10 \cdot (t_f + r) \quad (2)$$

2. Porušení pásu smykem

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} \cdot A_v}{\sqrt{3} \cdot \sin \theta_1} / \gamma_{M5} \quad (3)$$

kde:

- A_0 – plocha průřezu dolního pásu [mm²],
 b_0 – šířka průřezu dolního pásu [mm],
 g – mezera mezi mezipásovými pruty [mm],

$$A_v = A_0 - (2 - \alpha) \cdot b_0 \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \quad (4)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 \cdot g^2}{3 \cdot t_f^2}}} \quad (5)$$

3. Porušení mezipásového prutu

$$N_{1,Rd} = 2 \cdot f_{y1} \cdot t_1 \cdot p_{eff} / \gamma_{M5} \quad (6)$$

kde:

- f_{y1} – mez kluzu materiálu mezipásového prutu [MPa],
 b_1 – šířka průřezu mezipásového prutu [mm] a

$$p_{eff} = t_w + 2 \cdot r + 7 \cdot t_f \cdot f_{y0} / f_{y1} \leq b_1 + h_1 - 2 \cdot t_1 \quad (7)$$

4. Porušení mezipásového prutu s výztuhou

$$N_{1,Rd} = 2 \cdot f_{y1} \cdot t_1 \cdot (b_{eff} + b_{eff,s}) / \gamma_{M5} \quad (8)$$

kde:

- t_s – tloušťka výztuhy [mm],
 a – účinná tloušťka svaru výztuhy [mm],

$$b_{eff} = t_w + 2 \cdot r + 7 \cdot t_f \cdot f_{y0} / f_{y1} \leq b_1 + h_1 - 2 \cdot t_1 \quad (9)$$

$$b_{eff,s} = t_s + 2 \cdot a + 7 \cdot t_f \cdot f_{y0} / f_{y1} \leq b_1 + h_1 - 2 \cdot t_1 \quad (10)$$

3.2 Dosazení skutečných hodnot a výsledné únosnosti

1. Porušení stojiny pásu - vyboulení stěny

$$b_w = \frac{100}{\sin 25^\circ} + 5 \cdot (9 + 15) \leq 2 \cdot 4 + 10 \cdot (9 + 15)$$

$$b_w = 355 \text{ mm} \leq 248 \text{ mm} \Rightarrow \text{rozhoduje } \underline{248 \text{ mm}}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{355 \cdot 6 \cdot 248}{\sin 25^\circ} / 1,0 = 1240 \cdot 10^3 \text{ N} = \underline{\underline{1240 \text{ kN}}}$$

2. Porušení pásu smykem

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 \cdot 26^2}{3 \cdot 9^2}}} = \underline{0,287} \quad A_v = 3877 - (2 - 0,287) \cdot 160 \cdot 9 + (6 + 2 \cdot 15) \cdot 9 = \underline{1734 \text{ mm}^2}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{355 \cdot 1734}{\sqrt{3} \cdot \sin 25^\circ} / 1,0 = 769,3 \cdot 10^3 \text{ N} = \underline{\underline{769,3 \text{ kN}}}$$

3. Porušení mezipásového prutu - první návrhová situace

$$p_{eff} = 6 + 2 \cdot 15 + 7 \cdot 9 \cdot 355 / 355 \leq 100 + 100 - 2 \cdot 4 \Rightarrow p_{eff} = \underline{99 \text{ mm}} \leq 192 \text{ mm}$$

$$N_{1,Rd} = 2 \cdot 355 \cdot 4 \cdot 99 / 1,0 = 281,2 \cdot 10^3 \text{ N} = \underline{\underline{281,2 \text{ kN}}}$$

4. Porušení mezipásového prutu s výztuhou - druhá návrhová situace

$$b_{eff} = 6 + 2 \cdot 15 + 7 \cdot 9 \cdot 355 / 355 \leq 100 + 100 - 2 \cdot 4 \Rightarrow b_{eff} = \underline{99 \text{ mm}} \leq 192 \text{ mm}$$

$$b_{eff,s} = 8 + 2 \cdot 4 + 7 \cdot 9 \cdot 355 / 355 \leq 100 + 100 - 2 \cdot 4 \Rightarrow b_{eff,s} = \underline{79 \text{ mm}} \leq 192 \text{ mm}$$

$$N_{1,Rd} = 2 \cdot 355 \cdot 4 \cdot (99 + 79) / 1,0 = 505,5 \cdot 10^3 \text{ N} = \underline{\underline{505,5 \text{ kN}}}$$

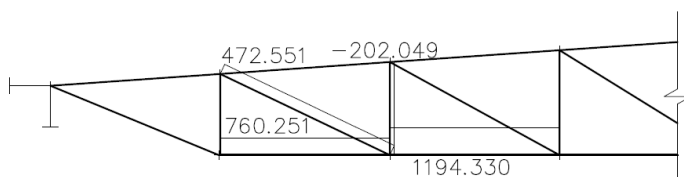
Z výsledných únosností vyplývá, že pro obě návrhové situace by mělo být rozhodujícím typem porušení - *porušení mezipásového prutu*, avšak při uvažování výztuhy pod taženou diagonálou je únosnost téměř o 80% větší, než bez této výztuhy. Numerické modely pak měly ukázat, zda se toto předpokládané chování potvrdí, i když není splněna výše zmíněná geometrická podmínka.

4 PARAMETRY NUMERICKÝCH MODELŮ

Modely styčnicku byly vytvořeny v MKP programu ANSYS 12.0 s využitím konečných prvků umožňující plastické chování materiálu i vliv velkých deformací. Pro modelování HEA profilu byl použit 3D konečný prvek SOLID 65 – definován osmi uzly a izotropními materiálovými vlastnostmi. RHS pruty pak byly vymodelovány za pomoci skořepinového konečného prvku SHELL 43 – definován čtyřmi uzly, čtyřmi tloušťkami a ortotropními materiálovými vlastnostmi (viz [4]).

Konečným prvkům byly zadány následující materiálové vlastnosti (podobně jako [5]): Youngův modul pružnosti $E = 210 \text{ GPa}$ a Poissonův součinitel $\nu = 0,3$. Při výpočtu byly uvažovány fyzikální i geometrické nelinearity (plastický výpočet s uvažováním velkých deformací). Pružno-plastické chování materiálu bylo vyjádřeno bilineárním pracovním diagramem (viz např. [6]) s mezí kluzu $f_y = 355 \text{ MPa}$ a s 5% zpevněním (tedy s hodnotou modulu zpevnění $E_2 = 10 \text{ GPa}$).

Síly, kterými byl styčník zatěžován, byly voleny na základě výsledků získaných na jednoduchém prutovém modelu celého vazníku (Obr. 3.) a to tak, aby byl zachován jejich poměr.



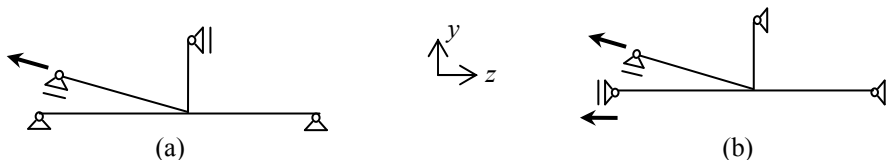
Obr. 3: Normálové síly v místě řešeného styčníku

Na základě dostupných informací v literatuře (např. [7], [8]) byly nejdříve zvoleny následující okrajové podmínky (Obr. 4. (a)):

- na obou koncích dolního pásu bylo zabráněno posunům ve směrech osy x , y i z a mezipásovým prutům bylo zabráněno posunům v rovině i z roviny (tedy umožněný pouze posun v osách prutů).

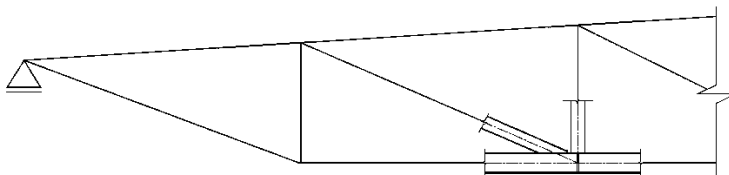
Při takto zvolených okrajových podmínkách však v 3D modelu vznikaly síly, které se neshodovaly s těmi, které byly očekávány v souvislosti s prutovým modelem. Bylo proto zapotřebí najít okrajové podmínky, které by více vystihovaly skutečné chování styčníku v kontextu k celé konstrukci. Nakonec byly zvoleny tyto (Obr. 4. (b)):

- na koncích dolního pásu bylo zabráněno pouze posunům ve směru os x a z (tedy pohybům v ose prutu a z jeho roviny), případně byla vazba na levém konci nahrazena zatížením tahovou silou. Vazba proti svislému posunutí (ve směru osy y) byla umístěna na svislý prut.



Obr. 4: (a) Původní okrajové podmínky; (b) Nově zvolené okrajové podmínky

Jako možný způsob řešení problému zavedení vhodných okrajových podmínek do modelu se nabízí možnost propojení 3D detailu konstrukce s 2D prutovými prvky, pomocí kterých by se vymodelovala konstrukce jako celek (viz Obr. 5). Okrajové podmínky a vnášené zatížení by se pak vztahovalo k celkové konstrukci a chování detailu by bylo odvozeno z chování celé soustavy. Správnost této hypotézy a vůbec realizovatelnost takového modelu je však nutné ještě prověřit.



Obr. 5: Propojení prutového a 3D modelu

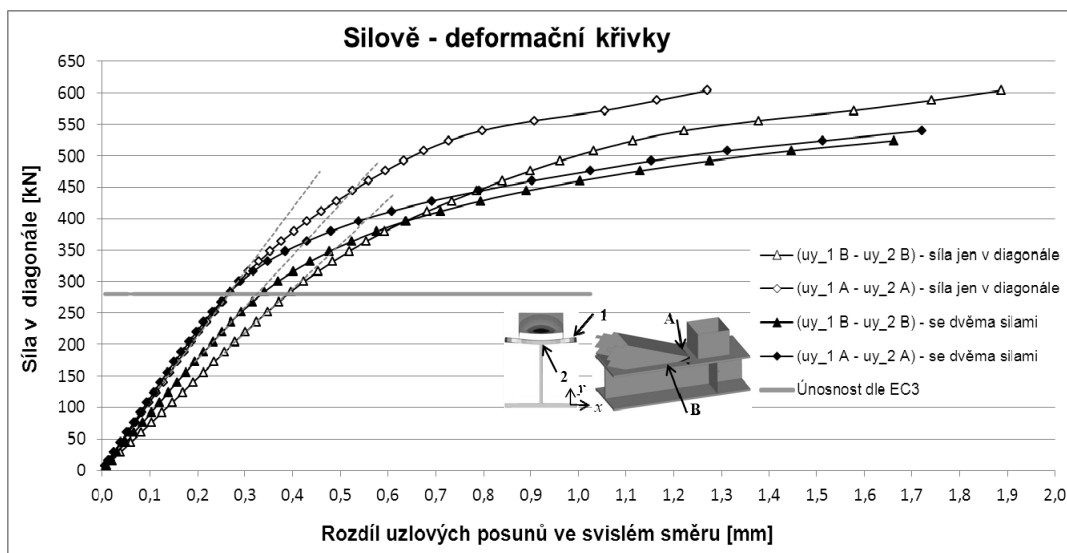
5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Zpracovány byly následující čtyři modely:

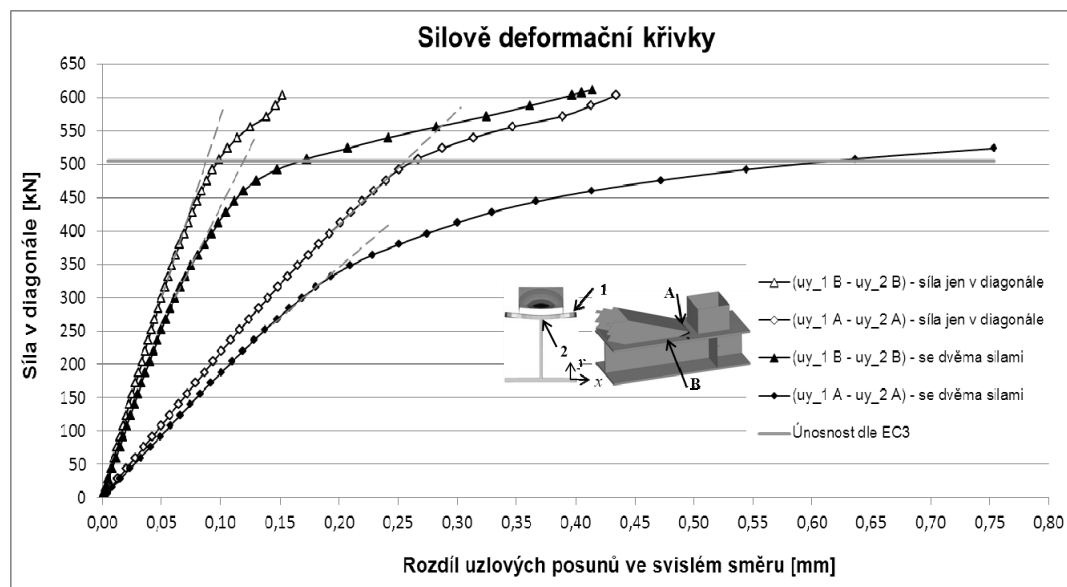
- styčník s výtuhou pouze pod tlačенou svislicí, zatížený jen tahovou silou v diagonále,

- styčník s výztuhou pouze pod tlačnou svislicí, zatížený tahovou silou v diagonále a v dolním pásu,
- styčník s výztuhou pod tlačnou svislicí i taženou diagonálou, zatížený jen tahovou silou v diagonále a
- styčník s výztuhou pouze pod tlačnou svislicí i taženou diagonálou, zatížený tahovou silou v diagonále a v dolním pásu.

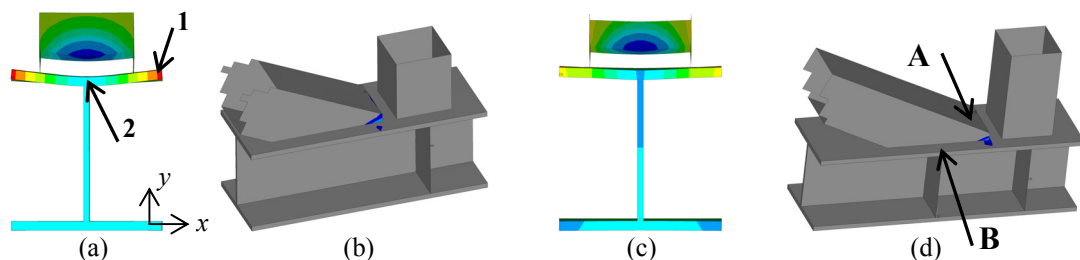
Kromě průběhů napětí byla na modelech sledována také závislost svislé deformace (u_y) středu pásnice (bod 2) na deformaci okraje pásnice (bod 1) HEA profilu (Obr. 6., Obr. 7.) a to ve dvou řezech - pod hranou připojené diagonály (řez A) a blízko jejího středu (tedy v blízkosti napojení druhé výztuhy - řez B) - viz Obr. 8. - 10.



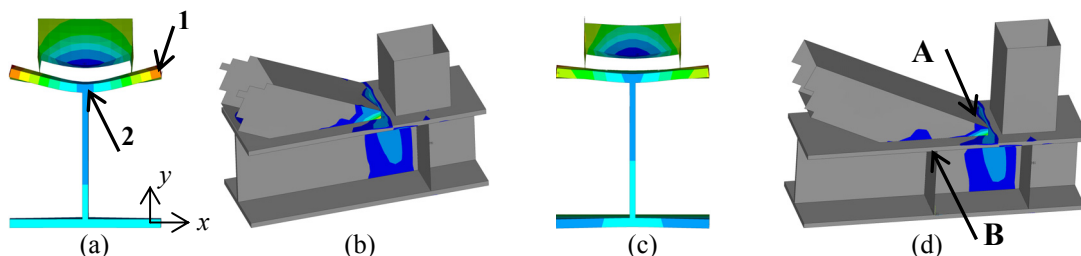
Obr. 6: Silově - deformační křivky pro modely s jednou výztuhou a srovnání s únosností dle EC3



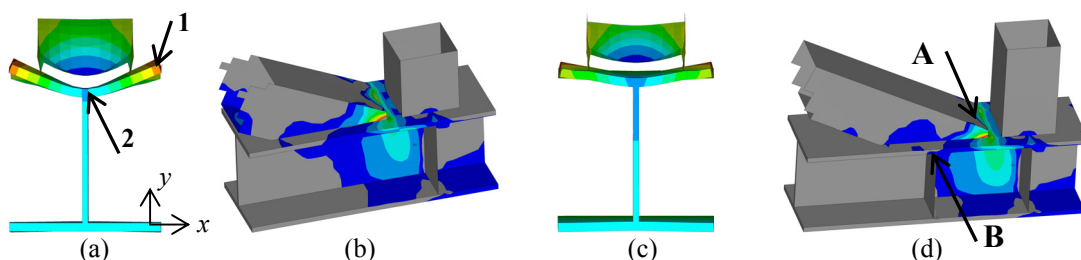
Obr. 7: Silově - deformační křivky pro modely se dvěma výztuhami a srovnání s únosností dle EC3



Obr. 8: Srovnání deformace pásnice a rozvoje plastických napětí nevztuženého (a)+(b) a vztuženého (c)+(d) HEA profilu při zatížení silou **300 kN** v diagonále (zvětšené měřítko deformací - 20x).



Obr. 9: Srovnání deformace pásnice a rozvoje plastických napětí nevztuženého (a)+(b) a vztuženého (c)+(d) HEA profilu při zatížení silou **444 kN** v diagonále (zvětšené měřítko deformací - 20x).



Obr. 10: Srovnání deformace pásnice a rozvoje plastických napětí nevztuženého (a)+(b) a vztuženého (c)+(d) HEA profilu při zatížení silou **508 kN** v diagonále (zvětšené měřítko deformací - 20x).

6 ZÁVĚR

Podarilo se vytvořit numerický model, který vystihuje předpokládané chování styčnicku. Jedním ze závěrů této práce je, že na únosnost samotného styčnicku nemá významný vliv, zda zatěžujeme pouze taženou diagonálu, nebo také spodní pás. Významný rozdíl je zde pouze ve výsledných absolutních hodnotách deformací, což je v souladu s principem výpočtu únosnosti takového styčnicku dle EC3.

Ze silově-deformačních křivek na Obr. 6 a 7 je patrné, že styčník s výztuhou pod taženou diagonálou byl schopen přenést výrazně větší zatížení, než styčník bez této výztuhy. Je-li jako kritérium poruchy styčnicku brán nárůst rozdílu mezi deformací okraje a středu pásnice HEA profilu, lze vyvodit závěr o únosnosti styčnicku v jednotlivých návrhových situacích. Únosnost styčnicku s jednou výztuhou se bude pohybovat okolo 300 kN a styčník se dvěma výztuhami bude schopen přenést až 508 kN. První model vykazoval zjevné známky *porušení mezipásového prutu*, zatímco u druhého modelu tento způsob poruchy nebyl natolik zřejmý. S přihlédnutím k rozvoji plastických napětí a k deformaci celého styčnicku při druhé návrhové situaci by se mohlo jeho porušení

klasifikovat spíše jako *porušení pásu smykem*. Problematika určení rozhodujícího typu porušení u numerického modelu si vyžaduje ještě další, podrobnější modelování a zkoumání.

Kromě již zmíněného, ukázaly výsledky získané sledováním deformací dvojice bodů pásnice HEA profilu, že ač styčník svou geometrií nespadá do mezí daných Eurokódem, jeho chování a únosnost se předpokladům této normy velice blíží.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finanční podpory projektu MŠMT číslo SP2012/135 (Studentská grantová soutěž VŠB - TUO).

LITERATURA

- [1] ČSN EN 1993-1-8, Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků. Český normalizační institut, 2006. 126s.
- [2] Wald, F., Sokol, Z. *Navrhování styčníků*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. 144 pp. ISBN 80-01-02073-8
- [3] Wardenier, J. *Hollow Sections in Structural Applications*. CIDECT, 2001. ISBN 0-471-49912-9
- [4] *Release 11.0 Documentation for ANSYS* [online]. [cit. 2012-4-25]. Dostupné z <<http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp>>
- [5] Jurčíková, A., Rosmanit, M.: Numerické modelování svařovaného T-styčníku. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, řada stavební*, Ostrava. Číslo 2, 2011. Ročník XI. ISSN 1213-1962, 6p.
- [6] de Lima, L. R. O., Vellasco, P. C. G. da S., da Silva, J. G. S., Neves, L. F. da C., Bittencourt, M. C. A numerical analysis of tubular joints under static loading. In *Proceedings of APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI*, Kyoto, Japan. December 3-6, 2007.
- [7] Vegte, G. J. van der, Makino, Y., Wardenier, J. The influence of boundary conditions on the chord load effect for CHS gap K-joints. In *Connections in Steel Structures*. Amsterdam. June 3-4, 2004.
- [8] Choo, Y. S., Qian, X. D., Wardenier, J. Effects of boundary conditions and chord stresses on static strength of thick-walled CHS joints. In *Journal of Constructional Steel Research.*, Volume 62, Issue 4, April 2006, Pages 316–328

Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Stanislav Kmeť, PhD., Katedra kovových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební, TU v Košiciach.

Ing. Milan Pilgr, Ph.D., Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební, VUT v Brně.